ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



Check for updates

УДК 004.58
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-203-211

Научная статья



Размещение нескольких виртуальных объектов в физическом пространстве в приложениях дополненной реальности

М.В. Алпатова, **Ю.В. Рудяк**
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация
m.v.alpatova@yandex.ru

Аннотация
Введение. Проблемы, связанные с размещением виртуальных объектов в реальной среде, существенно ограничивают возможности технологии дополненной реальности (AR). Такая ситуация выявляет пробел в научных знаниях, требующий дополнительного исследования. Поэтому основной задачей данного исследования явилась разработка метода оптимального размещения виртуальных объектов, при котором происходит минимизация целевой функции комфортности. Такой подход направлен на усовершенствование систем AR и развитие соответствующей теории.

Материалы и методы. Проведенное исследование основывается на анализе размещения виртуальных объектов в AR/VR приложениях с особым акцентом на оптимизацию. Было предложено понятие комфортности размещения, учитывающее размеры объекта и расстояния до границ свободного пространства по координатам X, Y, Z.

Результаты исследования. В рамках исследования были получены формулы для оптимального размещения объектов с произвольной функцией комфортности. Основным критерием является минимизация разницы между уровнями комфортности с разных сторон объекта. Было выявлено, что успешное размещение объектов требует учета их размеров и зон комфортности, а также решения системы из n линейных уравнений.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты представляют собой важный вклад в исследование проблемы размещения виртуальных объектов в AR/VR/MR. Они открывают новые возможности для улучшения взаимодействия с пользователями и проведения дальнейших исследований в области пространственных вычислений. Возможными направлениями для дальнейшего развития являются динамические корректировки и интеграция полученных результатов в различные XR-сценарии.

Ключевые слова: дополненная реальность, виртуальные объекты, физическое пространство, рациональное размещение, математическая модель, уравнения

Благодарности: данное исследование осуществлено благодаря финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 21–510–07004. Выражаем признательность коллегам, участвующим в данном гранте, за их ценный вклад в работу. Кроме того, хотим поблагодарить редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Алпатова М.В., Рудяк Ю.В. Размещение нескольких виртуальных объектов в физическом пространстве в приложениях дополненной реальности. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):203–211. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-203-211

Original article

Placement of Multiple Virtual Objects in Physical Space in Augmented Reality Applications

Marianna V. Alpatova , **Yuri V. Rudyak**
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation
✉ m.v.alpatova@yandex.ru

Abstract

Introduction. The challenges of placing virtual objects in a real-world environment limit the potential of augmented reality (AR) technology. This situation identifies a gap in scientific knowledge that requires additional research. Therefore, the main task of this study was to develop a method for optimal placement of virtual objects, in which the objective function of comfort was minimized. This approach is aimed at improving AR systems and developing the corresponding theory.

Materials and Methods. The conducted research was based on the analysis of the placement of virtual objects in AR/VR applications with particular emphasis on optimization. The concept of comfort of placement was proposed, taking into account the size of the object and the distance to the boundaries of free space in X, Y, Z coordinates.

Results. As part of the study, formulas were obtained for the optimal placement of objects with an arbitrary comfort function. The basic criterion was to minimize the difference between comfort levels from different sides of the object. It was found that a successful placement of objects required taking into account their size and comfort zones, as well as solving a system of *n* linear equations.

Discussion and Conclusion. The results obtained make an important contribution to the study of the problem of placing virtual objects in AR/VR/MR. They open up new opportunities for improving user interaction and conducting further research in the field of spatial computing. Possible directions for further development are dynamic adjustments and integration of the results into various XR scenarios.

Keywords: augmented reality, virtual objects, physical space, optimal placement, mathematical model, equations

Acknowledgements: this research was carried out thanks to the financial support of the RFBR in the framework of scientific project no. 21–510–07004. We acknowledge participation and valuable contribution of our colleagues in this grant work. In addition, we would like to thank the editorial team of the journal and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

For citation. Alpatova MV, Rudyak YuV. Placement of Multiple Virtual Objects in Physical Space in Augmented Reality Applications. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2): 203–211. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-203-211

Введение. Быстрое развитие технологии дополненной реальности (AR) открывает новые возможности в различных областях — от развлечений до образования и промышленных приложений [1, 2]. Однако, несмотря на значительные успехи, существует множество проблем, которые необходимо преодолеть, особенно в контексте размещения нескольких виртуальных объектов в реальной среде. Одна из таких проблем — рациональное размещение виртуальных объектов в приложениях дополненной реальности для обеспечения оптимального и комфортного пользовательского опыта [3–5].

Указанная проблема возникает в связи с необходимостью понимания устройством физического пространства. Для эффективного размещения виртуальных объектов в реальном мире приложение должно иметь возможность корректно интерпретировать материальное окружение, в котором находится пользователь, используя сенсоры и камеры мобильных устройств [6].

В данной статье представлен новый подход к определению оптимального размещения виртуальных объектов в физическом пространстве. Эта проблема имеет некоторые сходства с другой близкой к ней темой генеративного контекстного дополнения сцены (contextual scene augmentation, CSA), где основная цель заключается в создании гармоничного и удобного взаимодействия между виртуальными и физическими объектами [7, 8]. Однако предлагаемый авторами подход отличается от упомянутого, так как он фокусируется на определении оптимального расстояния между объектами с использованием монотонной функции комфортности, в то время как CSA учитывает семантику сцены, контекст и смысл виртуальных объектов.

Существующие подходы к решению проблемы оптимального размещения виртуальных объектов обычно ограничены предположениями о форме функции комфортности и не всегда гарантируют оптимальность решения. В данной статье предлагается новый подход, который значительно отличается от используемых в настоящее время. Это позволяет более гибко находить рациональное расположение виртуальных объектов и

предоставляет универсальное решение для различных сценариев и условий. Термин «рациональное размещение» применяется по следующим соображениям: во-первых, окончательный выбор при предлагаемых рекомендациях все же остаётся на усмотрение пользователя; во-вторых, несмотря на то, что в контексте данной работы решается задача минимизации целевой функции, она содержит элементы нечётких множеств.

В рамках данной работы вводится понятие оптимального размещения набора виртуальных объектов в одномерном физическом пространстве. Разработана модель, позволяющая решать задачу оптимального размещения набора объектов и приводящая, независимо от выбора вида функции комфортности, к системе линейных уравнений для определения оптимальных расстояний между объектами. В качестве примера приведено решение задачи для случая с двумя виртуальными объектами.

Цель данной статьи предложить и продемонстрировать новый подход к определению оптимального размещения виртуальных объектов в физическом пространстве, обосновать его применимость и эффективность. Представлены математические формулировки и методы решения задачи оптимального размещения, а также примеры практического применения полученных результатов. Это позволит выявить новые возможности для улучшения взаимодействия между виртуальными и физическими объектами, а также способствовать развитию теории и практики дополненной реальности.

Таким образом, данная статья направлена на углубление понимания проблемы оптимального размещения виртуальных объектов в физическом пространстве и предложение нового подхода к её решению. Результаты исследования могут быть использованы для создания более эффективных и удобных в использовании систем виртуальной реальности, а также для дальнейшего развития теории в данной области.

Материалы и методы. Размещение виртуальных объектов в реальном физическом пространстве — это задача, которая возникает практически в каждом AR/VR приложении. При всей своей простоте она может создавать большие проблемы в случае недостаточного внимания к вопросу оптимизации размещения таких объектов, вплоть до полного отказа большого количества потенциальных пользователей работать с упомянутыми приложениями. Наиболее остро стоит задача оптимизации, когда необходимо разместить сразу несколько виртуальных объектов в заданном физическом пространстве. При этом, даже в случае размещения только одного объекта, лишь совсем недавно было сформулировано понятие «комфортности» его размещения и предложена соответствующая модель [9], состоящая в следующем.

Объект, встраиваемый в трёхмерную физическую область, представляется в виде прямоугольного параллелепипеда с характерными размерами: l — длина; d — ширина; h – высота. При этом для каждой из координат X, Z, Y вводится следующее понятие комфортности размещения. Понятно, что размер свободного пространства не должен быть меньше размера объекта, но, помимо этого, для каждой координаты вводится понятие комфортных расстояний от объекта до границы свободного пространства. Например, для координаты X введём понятие комфортного расстояния слева — D_- и справа — D_+ и, соответственно, левой и правой комфортности — K_- и K_+. Обозначим расстояния слева и справа от объекта до границы свободного пространства X_- и X_+. Будем считать, что $K_- = 1$, если $X_- \geq D_-$ и уменьшается до 0 при приближении D_- к нулю. Например, для простоты возьмём линейные зависимости $K_-\left(X_-/D_-\right)$ и $K_+\left(X_+/D_+\right)$:

$$K_- = \begin{cases} \dfrac{X_-}{D_-}, \ X_- < D_-, \\ 1, \ X_- \geq D_- \end{cases}. \quad (1)$$

Зависимость $K_+\left(X_+/D_+\right)$ аналогична (1). Точно таким же образом введём понятие комфортности с одной и другой стороны для координат Z и Y.

Если размер свободного пространства по горизонтали $L \geq D_- + l + D_+$, то проблема комфортного размещения ($K_- = K_+ = 1$) не возникает, и все проблемы появляются, когда $l \leq L \leq D_- + l + D_+$. В этом случае вводится понятие комфортности размещения объекта, когда комфортность с одной стороны не достигается за счёт комфортности с другой стороны. Введём целевую функцию комфортности:

$$K_2 = \left(K_- - K_+\right)^2. \quad (2)$$

Под оптимальным размещением будем понимать такое размещение, при котором достигается минимум K_2. Очевидно, что это происходит, если $K_- = K_+$.

Как было показано в работе [9], если зависимости $K_-\left(X_-/D_-\right)$ и $K_+\left(X_+/D_+\right)$ линейны, минимум целевой функции (2), соответствующий оптимальному размещению объекта, достигается при следующих значениях X_- и X_+:

$$X_- = (L - l)\frac{D_-}{D_- + D_+},$$

$$X_+ = L - X_- - l = (L - l)\frac{D_+}{D_- + D_+}. \quad (3)$$

Формулы (3) просты и удобны для оптимального размещения одного виртуального объекта. Как отмечается в [9], их недостаток состоит в том, что они были выведены для случая линейных (1) функций комфортности $K_-(X_-/D_-)$ и $K_+(X_+/D_+)$. Покажем, что они справедливы всегда, если функции $K_-(X_-/D_-)$ и $K_+(X_+/D_+)$, представляют собой одну и ту же функцию *k(x)*, удовлетворяющую условию, что она монотонно возрастает для $0 \le x \le 1$, и равна 1 при $x > 1$. Вид такой функции $K_-(X_-/D_-) = k(x)$ представлен на рис. 1.

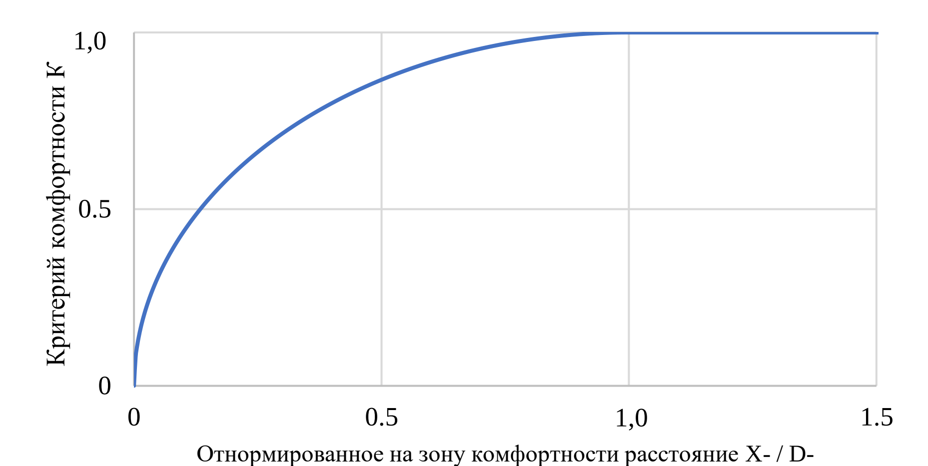


Рис. 1. Зависимость функции комфортности $k(x) = \begin{cases} \sqrt{1 - x^2}, & 0 \le x \le 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases}$

Ниже на рис. 2 и 3 представлены дополнительно ещё две функции — кубическая и линейная, демонстрирующие схожее описываемое поведение.

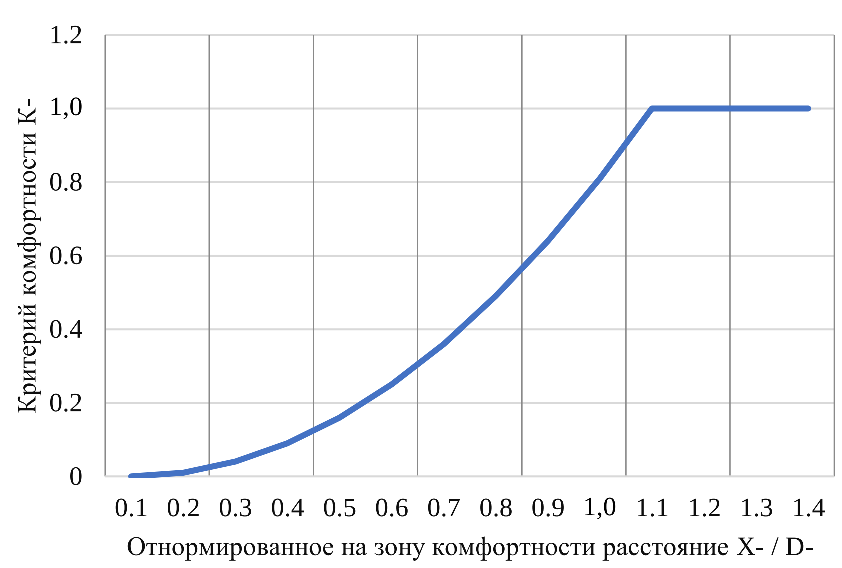


Рис. 2. Зависимость функции комфортности $k(x) = \begin{cases} x^2, & 0 \le x \le 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases}$

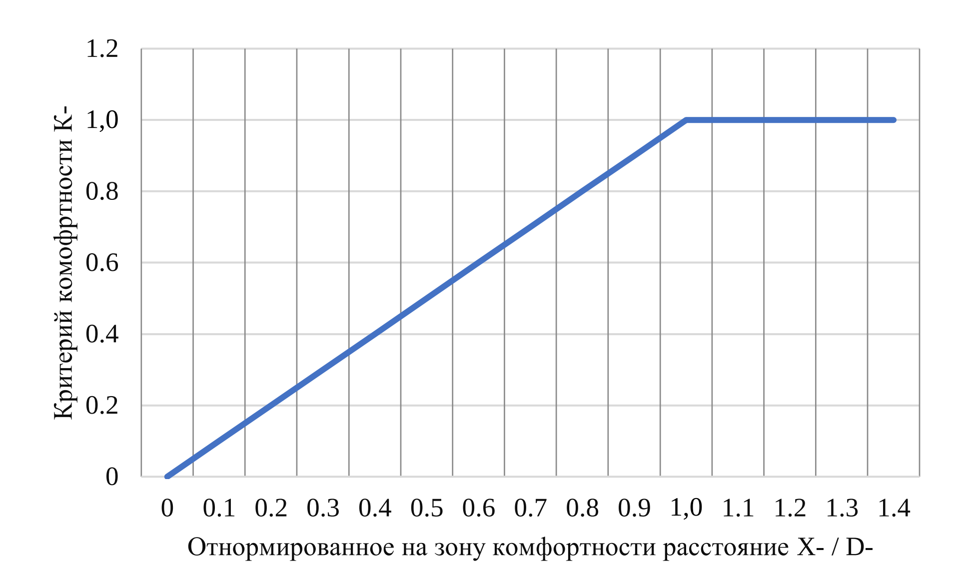


Рис. 3. Зависимость функции комфортности $k(x) = \begin{cases} x, \ 0 \le x \le 1 \\ 1, \ x > 1 \end{cases}$

Действительно, пусть нам надо встроить объект размером *l* с комфортными расстояниями слева D_- и справа D_+ в пространство, ограниченное размером *L*, и при этом выполнены условия $l \le L \le D_- + l + D_+$. Тогда, если односторонние комфортности представимы в виде $K_-\left(X_-/D_-\right) = k\left(x_-\right)$, $K_+\left(X_+/D_+\right) = k\left(x_+\right)$, где $x_- = X_-/D_-$, $x_+ = X_+/D_+$, а зависимость *k(x)*, удовлетворяет вышеназванным условиям, то из условия минимума целевой функции (2) получим $K_- = K_+ \Rightarrow k\left(X_-/D_-\right) = k\left(X_+/D_+\right)$.

Для конкретно заданной нелинейной функции комфортности *k(x)* можно численно решать полученное уравнение одним из известных методов. Однако, поскольку односторонние комфортности описываются автомодельной функцией *k(x)*, из уравнения $k\left(X_-/D_-\right) = k\left(X_+/D_+\right)$ получаем соотношение $X_-/D_- = X_+/D_+$, откуда с учётом равенства $L = X_- + l + X_+$ вытекают равенства (3).

Таким образом, показано, что простые и достаточно удобные равенства (3), позволяющие встраивать объект с оптимальной комфортностью справедливы для любой функции односторонней комфортности *k(x)*.

Результаты исследования. В реальной ситуации возникает необходимость размещения сразу нескольких объектов. В этом случае решать последовательно задачи оптимального размещения сначала первого объекта, потом второго, третьего и т.д. нет смысла, поскольку при размещении следующего объекта возникает необходимость сдвигать ранее установленные объекты, чтобы размещение было оптимальным по совокупности всех объектов. Если выполнено условие $L < \sum_{i=1}^{n} l^{(i)}$, объекты в принципе не умещаются в свободном пространстве протяжённости L. Если же $L \ge \sum_{i=1}^{n}\left(D_-^{(i)} + l^{(i)} + D_+^{(i)}\right)$, то объекты можно разместить так, чтобы они не мешали друг другу. Реально задача оптимального размещения возникает, если выполнены условия:

$$\sum_{i=1}^{n} l^{(i)} < L < \sum_{i=1}^{n}\left(D_-^{(i)} + l^{(i)} + D_+^{(i)}\right). \tag{4}$$

В этом случае введём целевую функцию:

$$K_\Sigma = K_2^{(1)} + K_2^{(2)} + \ldots + K_2^{(n)}, \tag{5}$$

где $K_2^{(i)}$ — определяемая формулой (2) комфортность *i*-го объекта. При этом, если имеются 2 последовательных объекта с номерами *i* и *i*+1, то комфортное их соседство будет, если расстояние между ними не менее, чем $D_+^{(i)} + D_-^{(i+1)}$, что соответствует новым комфортным расстояниям $\tilde{D}_+^{(i)} = \tilde{D}_-^{(i+1)} = D_+^{(i)} + D_-^{(i+1)}$, *i*=1,2,…,(*n*-1) поскольку комфортное расстояние до стены это одно, а до другого объекта, откуда может быть что-то выдвинуто, совсем другое. Рациональное расположение встраиваемых объектов определяется минимумом целевой функции (5).

Минимум целевой функции (5) с учётом (2) даёт нам систему из n уравнений:

$$K_2^{(1)} = 0;\ K_2^{(2)} = 0;\ \ldots,\ K_2^{(n)} = 0\ . \tag{6}$$

Из (6) следует:

$$K_-^{(i)} = K_+^{(i)};\ i = 1, 2, 3, \ldots, n\ . \tag{7}$$

Система уравнений (7) может быть записана в следующем виде:

$$\begin{gathered}
k\left(\frac{X_-^{(1)}}{D_-^{(1)}}\right) = k\left(\frac{X_-^{(2)}}{\tilde{D}_+^{(1)}}\right), \\
k\left(\frac{X_-^{(i)}}{\tilde{D}_-^{(i)}}\right) = k\left(\frac{X_-^{(i+1)}}{\tilde{D}_+^{(i)}}\right),\ \ i = 2, 3, \ldots (n-1), \\
k\left(\frac{X_-^{(n)}}{\tilde{D}_-^{(n)}}\right) = k\left(\frac{L - \sum\limits_{i=1}^{n}\left(X_-^{(i)} + l^{(i)}\right)}{\tilde{D}_+^{(n)}}\right).
\end{gathered} \tag{8}$$

То есть мы получили n уравнений относительно n неизвестных $X_-^{(1)}, X_-^{(2)}, \ldots, X_-^{(n)}$, где $X_-^{(1)}$ — расстояние первого объекта от левого края области встраивания, $X_-^{(i)},\ i = 2, 3, \ldots, n$ — расстояние между объектами с номерами i и (i-1).

Поскольку функция $k(x)$ монотонная, система (8) сводится к линейной системе уравнений, которая никак не зависит от вида самой функции комфортности $k(x)$.

$$\begin{gathered}
\frac{X_-^{(1)}}{D_-^{(1)}} = \frac{X_-^{(2)}}{\tilde{D}_+^{(1)}}, \\
\frac{X_-^{(i)}}{\tilde{D}_-^{(i)}} = \frac{X_-^{(i+1)}}{\tilde{D}_+^{(i)}}, \\
\frac{X_-^{(n)}}{\tilde{D}_-^{(n)}} = \frac{L - \sum\limits_{i=1}^{n}\left(X_-^{(i)} + l^{(i)}\right)}{\tilde{D}_+^{(n)}}.
\end{gathered} \tag{9}$$

Система (9) может решаться одним из известных методов. Однако, ввиду того, что матрица системы (9) является сильно разрежена, решение системы можно найти достаточно просто. Например, в первых (n-1) уравнениях можно в каждом i-м уравнении выразить $X_-^{(i+1)}$ через $X_-^{(i)}$, затем, подставив это в последнее уравнение, получить линейное уравнение относительно $X_-^{(1)}$. После этого, двигаясь от первого уравнения к (n-1)-му, можно последовательно найти $X_-^{(2)}, X_-^{(3)}, \ldots, X_-^{(n)}$.

В случае размещения двух виртуальных объектов, n=2, система (9) принимает следующий вид:

$$\begin{gathered}
\frac{X_-^{(1)}}{D_-^{(1)}} = \frac{X_-^{(2)}}{\tilde{D}_+^{(1)}}, \\
\frac{X_-^{(2)}}{\tilde{D}_-^{(2)}} = \frac{L - X_-^{(1)} - X_-^{(2)} - l^{(1)} - l^{(2)}}{\tilde{D}_+^{(n)}}.
\end{gathered} \tag{10}$$

Из системы (10) находим:

$$\begin{gathered}
X_-^{(1)} = \frac{\left(L - l^{(1)} - l^{(2)}\right)\tilde{D}_-^{(2)} D_-^{(1)}}{\left(\tilde{D}_-^{(2)} + D_+^{2}\right)\tilde{D}_+^{(1)} + D_-^{(1)}\tilde{D}_-^{(2)}}, \\
X_-^{(2)} = \frac{\left(L - l^{(1)} - l^{(2)}\right)\tilde{D}_-^{(2)}\tilde{D}_+^{(1)}}{\left(\tilde{D}_-^{(2)} + D_+^{2}\right)\tilde{D}_+^{(1)} + D_-^{(1)}\tilde{D}_-^{(2)}}.
\end{gathered} \tag{11}$$

где $X_-^{(1)}$ — это расстояние между первым объектом и левым краем пространства; $X_-^{(2)}$ — расстояние между правым краем первого объекта и левым краем второго объекта.

Рассмотрим пример (12) когда:

$$L = 100,\ l^{(1)} = 40,\ l^{(2)} = 30,\ D_{-}^{(1)} = 10, D_{+}^{(1)} = 5, D_{-}^{(2)} = 11, D_{+}^{(1)} = 13\,. \qquad (12)$$

Поскольку выполнены условия (13), то:

$$l^{(1)} + l^{(2)} < L < l^{(1)} + l^{(2)} + D_{-}^{(1)} + D_{+}^{(1)} + D_{-}^{(2)} + D_{+}^{(1)} \qquad (13)$$

Для оптимальной расстановки двух объектов можно воспользоваться выражениями (11), которые дают независимо от вида *k(x)* в этом случае $X_{-}^{(1)} \approx 7{,}692;\ X_{-}^{(2)} \approx 12{,}308;\ K_{2}^{(1)} = K_{2}^{(2)} = 0$. При этом значение односторонней комфортности зависит от вида *k(x)*. Для линейной зависимости *k(x)*, изображённой на рис. 3, $K_{-}^{(1)} = K_{+}^{(1)} = K_{-}^{(2)} = K_{+}^{(2)} \approx 0{,}769$. Если зависимость *k(x)* соответствует рис. 1, получим значение комфортности $K_{-}^{(1)} = K_{+}^{(1)} = K_{-}^{(2)} = K_{+}^{(2)} \approx 0{,}973$.

Таким образом, в работе введено понятие оптимального размещения набора виртуальных объектов в физическом пространстве. Разработана модель, позволяющая решать задачу оптимального размещения набора объектов. Показано, что решение этой задачи не зависит от вида монотонной функции комфортности.

Обсуждение и заключение. Рассмотрен теоретический аспект важного вопроса оптимального размещения набора виртуальных объектов в физическом пространстве — проблемы, часто встречающейся в приложениях дополненной реальности. Предложив новую математическую модель и включив нечёткую логику, мы заложили основу для алгоритма, который потенциально может помочь пользователям найти рациональное и удобное расположение виртуальных объектов в их реальном окружении.

Основы, заложенные в данном исследовании, показывают, что предложенная модель эффективно решает задачи, связанные с размещением множества виртуальных объектов в заданном физическом пространстве. Анализируя виртуальные плоскости и учитывая расстояния между виртуальными объектами и краями этих виртуальных плоскостей, наш метод обеспечивает рациональное размещение с учётом линейных размеров виртуальных объектов и заложенной комфортной зоны вокруг них.

Полученные результаты способствуют текущему развитию приложений дополненной и смешанной реальности, предоставляя теоретическое решение проблемы оптимального размещения, которое, в свою очередь, способно улучшить взаимодействие с пользователем и общую удовлетворённость инструментами обсуждаемой технологии. Более того, возможные применения приведенного исследования выходят за рамки AR-приложений, открывая новые пути для исследований в смежных областях, таких как виртуальная реальность, смешанная реальность и пространственные вычисления.

В свете полученных результатов данного исследования, будущие разработки могут быть направлены на проверку алгоритма путём эмпирического тестирования, включение динамических корректировок в реальном времени на основе поведения пользователя и изучение интеграции нашего подхода в различные сценарии XR-приложений. Поскольку область дополненной реальности продолжает развиваться, мы ожидаем, что наше исследование внесёт значительный вклад в развитие технологии, способствуя её широкому распространению и дальнейшему обогащению пользовательского опыта.

Список литературы

1. Mekni M., Lemieux A. *Augmented Reality: Applications, Challenges and Future Trends*. In: British Library Conference Proceedings: Applied Computational Science. Athens: WSEAS; 2014. P. 205–214. URL: https://www.cs.ucf.edu/courses/cap6121/spr2020/readings/Mekni2014.pdf (accessed: 29.03.2023)

2. Rick Van Krevelen, Ronald Poelman. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*. 2019;9(2):1–20. https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767

3. Rui Nóbrega, Diogo Cabral, Giulio Jacucci, et al. *NARI: Natural Augmented Reality Interface - Interaction Challenges for AR Applications*. In: Proc. Int. Conf. on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2015). Pasadena, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 2015. P. 504–510. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2240.1440

4. Kurkovsky S.A., Koshy R., Novak V., et al. *Current Issues in Handheld Augmented Reality*. In: Proc. 2012 Int. Conf. on Communications and Information Technology (ICCIT): 2012 International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT). Hammamet: IEEE; 2012. P. 68–72. https://doi.org/10.1109/ICCITechnol.2012.6285844

5. Irshad Sh., Rambli D.R.A. Advances in Mobile Augmented Reality from User Experience Perspective: A Review of Studies. In book: HB Zaman, et al. (eds.). Advances in Visual Informatics. Cham: Springer International Publishing; 2017. P.466–477. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70010-6_43

6. Turk M., Fragoso V. Computer Vision for Mobile Augmented Reality. In book: Gang Hua, Xian-Sheng Hua (eds.). Mobile Cloud Visual Media Computing. Cham: Springer International Publishing; 2015. P. 3–42. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24702-1_1

7. Keshavarzi M., Yang A., Caldas L., et al. Optimization and Manipulation of Contextual Mutual Spaces for Multi-User Virtual and Augmented Reality Interaction. In: Proc. 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Atlanta, GA: IEEE; 2020. P.353–362. https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00055

8. Z. Sadeghipour Kermani, Liao Z., Tan P., et al. Learning 3D Scene Synthesis from Annotated RGB-D Images. *Computer Graphics Forum*. 2016;35(5):197–206. https://doi.org/10.1111/cgf.12976

9. Alpatova M.V., Glazkov A.V., Rudyak Yu.V. *Mathematical Model of Rational Location of Augmented Reality Objects in User's Environment*. In: Proc. Int. Sci. Conf. “Smart Nations: Global Trends In The Digital Economy”. Cham: Springer International Publishing; 2022. P. 248–254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94873-3_30

References

1. Mekni M, Lemieux A. *Augmented Reality: Applications, Challenges and Future Trends*. In: British Library Conference Proceedings: Applied Computational Science. Athens: WSEAS; 2014. P. 205–214. URL: https://www.cs.ucf.edu/courses/cap6121/spr2020/readings/Mekni2014.pdf (accessed: 29.03.2023)

2. Rick Van Krevelen, Ronald Poelman. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *International Journal of Virtual Reality*. 2019;9(2):1–20. https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767

3. Rui Nóbrega, Diogo Cabral, Giulio Jacucci, et al. *NARI: Natural Augmented Reality Interface - Interaction Challenges for AR Applications*. In: Proc. Int. Conf. on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP 2015). Pasadena, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 2015. P. 504–510. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2240.1440

4. Kurkovsky SA, Koshy R, Novak V, et al. *Current Issues in Handheld Augmented Reality*. In: Proc. 2012 Int. Conf. on Communications and Information Technology (ICCIT): 2012 International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT). Hammamet: IEEE; 2012. P. 68–72. https://doi.org/10.1109/ICCITechnol.2012.6285844

5. Irshad Sh, Rambli DRA. Advances in Mobile Augmented Reality from User Experience Perspective: A Review of Studies. In book: HB Zaman, et al. (eds.). *Advances in Visual Informatics*. Cham: Springer International Publishing; 2017. P.466–477. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70010-6_43

6. Turk M, Fragoso V. Computer Vision for Mobile Augmented Reality. In book: Gang Hua, Xian-Sheng Hua (eds.). *Mobile Cloud Visual Media Computing*. Cham: Springer International Publishing; 2015. P.3–42. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24702-1_1

7. Keshavarzi M, Yang A, Caldas L, et al. *Optimization and Manipulation of Contextual Mutual Spaces for Multi-User Virtual and Augmented Reality Interaction*. In: Proc. 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Atlanta, GA: IEEE; 2020. P.353–362. https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00055

8. Z Sadeghipour Kermani, Liao Z, Tan P, et al. Learning 3D Scene Synthesis from Annotated RGB-D Images. *Computer Graphics Forum*. 2016;35(5):197–206. https://doi.org/10.1111/cgf.12976

9. Alpatova MV, Glazkov AV, Rudyak YuV. *Mathematical Model of Rational Location of Augmented Reality Objects in User's Environment*. In: Proc. Int. Sci. Conf. “Smart Nations: Global Trends In The Digital Economy”. Cham: Springer International Publishing; 2022. P. 248–254. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94873-3_30

Поступила в редакцию 02.04.2023
Поступила после рецензирования 18.04.2023
Принята к публикации 18.04.2023

Об авторах:

Марианна Валерьевна Алпатова, старший преподаватель кафедры информатики и информационных технологий Московского политехнического университета (107023 г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38) ScopusID, ORCID, AuthorID, m.v.alpatova@yandex.ru

Юрий Владимирович Рудяк, доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики и информационных технологий Московского политехнического университета (107023 г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38), ORCID, AuthorID, rudyak@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.В. Алпатова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, подготовка текста, формирование выводов.

Ю.В. Рудяк — научное руководство, проведение расчётов, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 02.04.2023
Revised 18.04.2023
Accepted 18.04.2023

About the Authors:

Marianna V. Alpatova, Senior Lecturer of the Computer Science and Information Technology Department, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023, RF), ScopusID, ORCID, AuthorID, m.v.alpatova@yandex.ru

Yuri V. Rudyak, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Computer Science and Information Technology Department, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023, RF), ORCID, AuthorID, rudyak@mail.ru

Claimed contributorship:

MV Alpatova: basic concept formulation; research objectives and tasks; text preparation; formulation of conclusions.

YuV Rudyak: academic advising; calculation analysis; revision of the text; correction of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.